

南海珊瑚砂剪切波速与抗液化强度关系研究

汪云龙^{1,2}, 王义德^{1,2,3*}, 陈龙伟^{1,2}, 马佳钧^{1,2}, 刘荟达⁴, 王 鸾⁵, 张文彬⁶, 袁晓铭^{1,2}

- (1. 中国地震局工程力学研究所 地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 中国地震局工程力学研究所 地震灾害防治应急管理
部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 3. 中国海洋大学 山东省海洋工程地质与环境重点实验室, 山东 青岛 266100;
4. 中国建设基础设施有限公司, 北京 100044; 5. 中国海外发展有限公司, 广东 深圳 518048;
6. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要: 南海岛礁珊瑚砂场地存在地震液化风险。剪切波速作为场地抗液化评估指标, 具有快速、无损的优势, 但历史震害资料表明, 现有判据在珊瑚砂场地的适用性存在局限, 亟需建立针对珊瑚砂的专门关系模型。研究采用GDS动三轴-弯曲元试验系统, 对饱和南海珊瑚砂及级配一致的对照石英砂分别开展循环不排水液化试验和弯曲元试验, 系统获得两类砂土的抗液化强度及剪切波速, 进而建立了珊瑚砂的剪切波速-抗液化强度定量关系模型。结合典型地震液化案例对模型的合理性和工程适用性进行了验证, 并据此提出了适用于珊瑚砂场地的液化临界剪切波速计算公式。研究表明: 珊瑚砂的剪切波速与抗液化强度具有良好的相关性, 且在相同强度条件下显著高于石英砂, 进一步印证珊瑚砂与陆源砂间的系统性差异; 所建立的珊瑚砂剪切波速-抗液化强度模型能够较为准确地表征不同地震强度下珊瑚砂土的抗液化能力。将该模型应用于历史震害场地检验中, 能够合理判别珊瑚砂层的液化范围。研究成果可为南海岛礁港口等珊瑚砂地基的地震安全评估和工程抗震设计提供理论参考。

关键词: 土力学; 珊瑚砂; 动三轴-弯曲元联合试验; 剪切波速; 抗液化强度; 场地液化判别

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2026)02-0613-13

第一作者: 汪云龙 (1985-), 现任副研究员, 主要从事岩土地震工程等方面的研究工作。E-mail: wyl_lem@hotmail.com

***通信作者:** 王义德 (1995-), 现任博士后, 主要从事土动力学与地震工程等方面的研究工作。E-mail: yide_wang@outlook.com

Relationship between shear wave velocity and liquefaction resistance of coral sand in the South China Sea

WANG Yunlong^{1,2}, WANG Yide^{1,2,3*}, CHEN Longwei^{1,2}, MA Jiajun^{1,2},

LIU Huida⁴, WANG Luan⁵, ZHANG Wenbin⁶, YUAN Xiaoming^{1,2}

- (1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin, Heilongjiang 150080, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin, Heilongjiang 150080, China; 3. Provincial Key Laboratory of Marine Engineering Geology and the Environment, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China; 4. China Construction Infrastructure Co., Ltd., Beijing 100044, China;
5. China Overseas Land & Investment Ltd., Shenzhen, Guangdong 518048, China; 6. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

收稿日期: 2025-09-15; **修回日期:** 2025-10-14

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目 (2023C07); 黑龙江省自然科学基金资助项目 (LH2023E020)

Supported by the Scientific Research Fund of Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration (Grant No. 2023C07) and Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (Grant No. LH2023E020)

Abstract: Coral sand deposits in the islands and reefs of the South China Sea are vulnerable to seismic liquefaction. Shear wave velocity provides a rapid and non-destructive method for assessing liquefaction potential; however, existing criteria, primarily developed for quartz sands, exhibit limited applicability to coral sands. This study aims to establish a specific relationship between shear wave velocity and cyclic resistance ratio for coral sand. A series of cyclic undrained triaxial tests and bender element tests were conducted using a GDS dynamic triaxial system on saturated coral sand from the South China Sea and comparable quartz sand. Systematic measurements of cyclic resistance and shear wave velocity were obtained for both materials, leading to the development of a quantitative model relating shear wave velocity to cyclic resistance for coral sand. The validity and engineering applicability of the proposed model were further validated through a case study of typical liquefaction sites, resulting in an empirical equation for the critical shear wave velocity of coral sand. The results indicate a strong correlation between shear wave velocity and cyclic resistance ratio in coral sand, with coral sand exhibiting significantly higher shear wave velocity than quartz sand at equivalent cyclic resistance ratio levels, thereby confirming their intrinsic mechanical differences. The proposed model effectively characterizes the liquefaction resistance of coral sand under varying seismic intensities and can accurately delineate liquefied layers in case analyses. This research provides a valuable reference for seismic safety assessments and foundation design in coral sand sites, such as islands and ports in the South China Sea.

Key words: soil mechanics; coral sand; dynamic triaxial-bender element test; shear wave velocity; liquefaction resistance; site liquefaction assessment

First author: WANG Yunlong (1985 -), associate research fellow, is engaged in geotechnical earthquake engineering. E-mail: wyl_jiem@hotmail.com

***Corresponding author:** WANG Yide (1995 -), postdoctoral research fellow, is engaged in soil dynamics and earthquake engineering. E-mail: yide_wang@outlook.com

1 引言

珊瑚砂广泛分布于南北纬 30° 之间的热带与亚热带海域, 是该区域填海造陆与海洋工程中的重要地基填料^[1-2]。与典型陆源硅质砂相比, 珊瑚砂因孔隙发育、钙盐含量高且颗粒易破碎, 呈现出显著不同的力学与工程特性^[3-5]。由于珊瑚砂分布与地震高发区部分重合, 相关场地在地震作用下存在发生大规模液化的风险。G. Chock 等^[6-11]已有记录表明, 1993 年关岛地震、2006 年夏威夷地震和 2010 年海地地震中均出现了珊瑚砂场地液化, 导致大量岛礁与港口的基础设施受损。随着海洋工程与岛礁基础设施的快速发展, 如何准确评估珊瑚砂场地的地震安全性已成为岩土工程领域的重要议题。

在岩土动力学分析中, 剪切波速(V_s)是表征土体小应变刚度与评估液化潜势的关键指标之一^[12-19]。 V_s 能反映土层在剪切荷载作用下的刚度特征, 并与抗液化强度(如循环抗力比, cyclic resistance ratio, CRR)具有较好的相关性^[20-23]。R. D. Andrus 等^[24-27]大量研究显示, V_s 可有效区分液化与非液化状态, 已被广泛用于工程液化判别。然而, 现行判别标准

主要基于陆源砂场地建立, 其在珊瑚砂场地的适用性尚不明确。基于 2006 年夏威夷地震的震害分析, 袁晓铭等^[1-2]发现, 在触发条件与陆源砂场地无显著差异的情况下, 发生液化的珊瑚砂层现场实测 V_s 均值约为 250 m/s, 修正剪切波速 V_{s1} (修正至有效应力 100 kPa 的剪切波速) 约为 314 m/s, 明显高于现行砂土液化层 220 m/s 的上限。这表明在相同抗液化强度下, 珊瑚砂与陆源砂的 V_s 可能存在系统性差异; 因此, 若将 V_s 作为珊瑚砂场地抗液化强度指标, 不能直接套用陆源砂得到的关系, 需要建立面向珊瑚砂的专门 V_s -CRR 模型。

近年来, 关于南海珊瑚砂的 V_s 特性与液化特性的研究已取得进展。汪云龙等^[28]基于 GDS 大三轴弯曲元系统测试表明, 南海珊瑚土 V_s 与含砾量呈正相关; 郭 祯等^[29]指出 V_s 与围压和密实度整体呈正相关; 施周桓等^[30]通过动三轴 - 弯曲元联合试验发现, 归一化最大剪切模量与抗液化强度之间呈近似单值关系, 提示基于 V_s 的抗液化评价方法对南海珊瑚砂具有潜在适用性; 史金权等^[31]进一步分析了颗粒特征对 V_s 的影响, 并基于试验对 Hardin 最大剪切模量公式进行了修正。在南海珊瑚砂液化特性方面, 国内学者如刘汉龙等^[32-52]都开展了大量试验研

究，丰富了南海珊瑚砂液化理论。然而，尽管已有证据表明珊瑚砂的抗液化强度与 V_s 相关，目前仍缺乏针对珊瑚砂的 V_s - CRR 定量关系，亦缺少以 V_s 为判据的理论依据与工程公式。

基于以上认识，本文采用配备弯曲元测试系统的 GDS 动三轴设备，对饱和珊瑚砂及级配一致的对照组石英砂开展循环加载液化试验，获得 2 类材料的 CRR ；同时，在液化试验前通过弯曲元试验获取对应试样初始应力状态下的 V_s ，进而对 V_s 与 CRR 进行回归分析，建立面向饱和珊瑚砂的 V_s - CRR 表征关系模型。最后结合历史地震案例讨论模型的合理性，并据此提出适用于珊瑚砂场地的液化判别公式。研究成果有望为珊瑚砂场地基于 V_s 的液化判别与地基强度评估提供理论支撑与工程参考。

2 动三轴 - 弯曲元联合试验

2.1 试验材料与样品制备

本试验使用取自南海某岛礁的珊瑚砂。为了方便与现有基于陆源土的研究结果进行对比并尽量排除颗粒级配对试验结果的影响，使用福建石英砂配制了与珊瑚砂级配相同的石英砂作为对照材料。二者级配曲线如图 1 所示。可以看出 2 种砂土颗粒分布较为均匀，粒径分布在 0.2~2.5 mm 范围。材料的主要物理指标如表 1 所示。本试验中制作的试样尺寸均为高 100 mm 和直径 50 mm。在制作试样时，使用预先烘干的珊瑚砂或石英砂采用砂雨法分层填筑试样至目标相对密度(D_r)，以保证试样的均质性，随后对试样施加 20 kPa 的围压使试样能够直立。使用二氧化碳冲洗试样，冲洗后对试样从底部注入脱气水进行水头饱和，随后进行反压饱和并进一步提高饱和度。当孔压系数 B 达到并稳定在 0.95 以上超过 45 min 时，认为试样达到饱和标准。在本研究中，当反压增加至 280 kPa 时，珊瑚砂与石英砂试样的 B 值都可以达到该饱和标准。为了试验结果的可对比性，所有试样在固结前的反压皆为 280 kPa。达到饱和和标准后，对试样进行均等固结，固结时间 4 h，此时试样应变极小，固结完成。

2.2 试验仪器与工况设计

试验采用中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动重点实验室的 GDS 动三轴 - 弯曲元测试系统进行(见图 2)，该系统可在同一试样上先后进行弯曲元波速试验与固结不排水循环加载试验，即实现动三轴 - 弯曲元联合测试，获得试样的 CRR 和

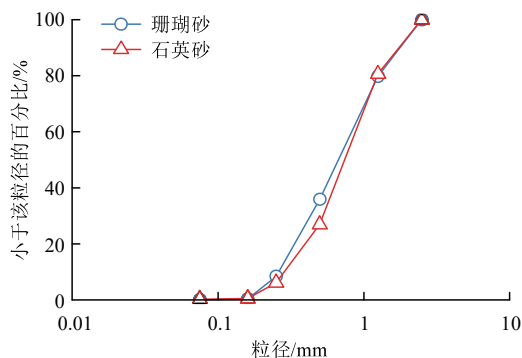
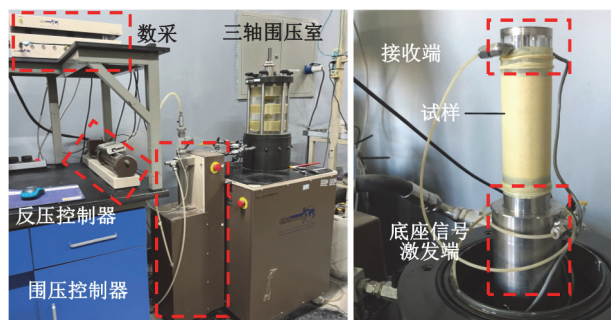


图 1 珊瑚砂与对照石英砂级配曲线

Fig.1 Gradation curves of coral sand and quartz sand

表 1 珊瑚砂与对照组石英砂主要物理指标
Table 1 Physical properties of coral and quartz sand

材料 (material)	颗粒相对密度 (relative density of particles) G_s	最大孔隙比 (maximum void ratio) e_{max}	最小孔隙比 (minimum void ratio) e_{min}	平均粒径 (average particle size) d_{50}/mm	不均匀系数 (coefficient of uniformity) C_u
珊瑚砂	2.75	1.15	0.74	0.72	3.20
石英砂	2.62	0.77	0.42	0.69	3.44



(a) GDS 动三轴 (b) 试样及弯曲元系统
(a) GDS equipment (b) Specimen and BE system

图 2 GDS 动三轴 - 弯曲元测试系统

Fig.2 GDS Dynamic triaxial-bender element testing system

V_s 。弯曲元测试 V_s 通过下式确定：

$$V_s = \frac{L_0}{t - \Delta t_2} \tag{1}$$

式中： L_0 为剪切波在试样中的传播距离，在制样时测量得到； t 为系统测定的剪切波从激发端传播至接收端所需的时间； Δt_2 为系统延时，在试验前通过将剪切波激发端与传播端直接接触的形式标定。采用时域初达波法判定剪切波的到达时刻，如图 3 所示。弯曲元测试采用频率为 5 kHz 的正弦波激发，经验证在本试验工况下具有较好的效果。

液化试验加载采用循环应力比 CSR 控制：

$$CSR = q_{cyc} / (2p'_0) \tag{2}$$

式中： q_{cyc} 为循环偏应力幅值， p'_0 为初始平均有效应力。液化试验采用频率为 0.5 的正弦波形加载。

所有试验均为均等固结，且 p'_0 皆为 100 kPa。

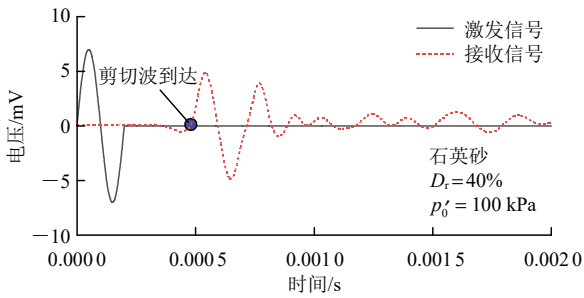


图3 典型弯曲元信号图

Fig.3 Typical bender element test signal graph

试验按试样的 D_r 分为 4 组，每组包括 4 个试样，分别施加不同的 CSR 进行液化试验，当孔隙水压力首次达到围压时，认为试样液化，终止试验；每个试样在液化试验前，通过弯曲元测试 p'_0 下的 V_s ，并取平均值作为该 D_r 试样组的 V_s 。具体工况安排如表 2 所示。

3 试验结果与分析

3.1 动三轴试验结果

珊瑚砂与石英砂在 $D_r = 50\%$ ， $CSR = 0.20$ 下的超孔压随循环振次变化曲线、循环有效应力路径、偏应力 - 轴向应变关系以及轴向应变随循环振次变化曲线如图 4 所示。可以看出，二者皆表现为典型的循环流动液化现象，超孔压随循环次数逐渐累积，并最终达到初始有效应力，说明试样在此时发生液

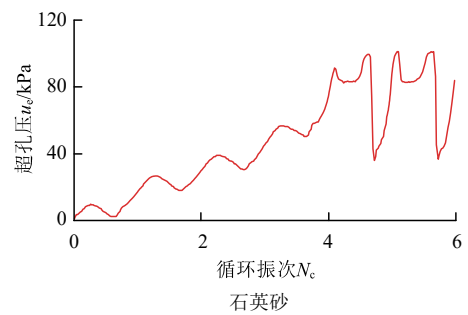
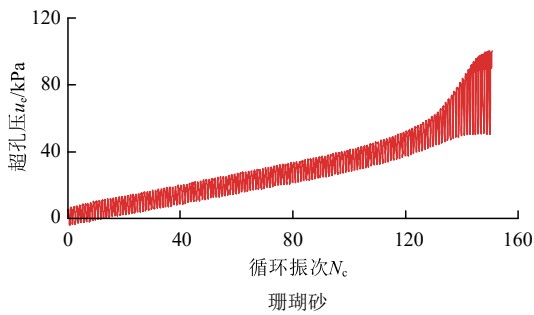
表 2 预先标定 V_s 的三轴液化试验工况设置

Table 2 Test conditions for triaxial liquefaction tests with pre-calibrated V_s

材料 (material)	$D_r / \%$	试样在 p'_0 下的 V_s (V_s under p'_0) / ($m \cdot s^{-1}$)	CSR
珊瑚砂	40	236.53, 235.72, 235.89, 236.38	0.15, 0.20, 0.25, 0.12
	50	248.49, 247.65, 248.48, 247.90	0.25, 0.20, 0.30, 0.23
	65	252.35, 252.88, 253.30, 252.79	0.30, 0.35, 0.25, 0.22
	80	253.62, 254.16, 253.81, 253.37	0.30, 0.25, 0.20, 0.35
石英砂	40	211.82, 211.63, 211.83, 211.68	0.15, 0.12, 0.08, 0.18
	50	213.26, 212.95, 212.51, 213.12	0.15, 0.10, 0.08, 0.20
	65	214.70, 214.78, 213.84, 214.08	0.25, 0.20, 0.18, 0.15
	80	225.73, 225.95, 226.59, 226.49	0.25, 0.30, 0.35, 0.23

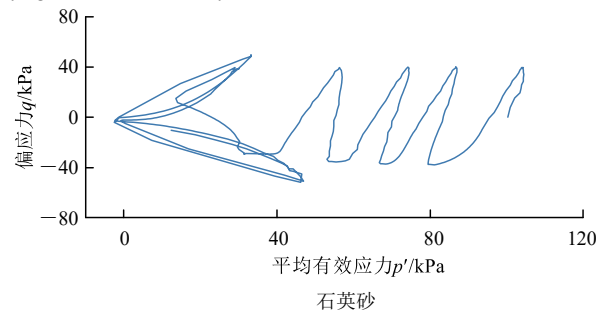
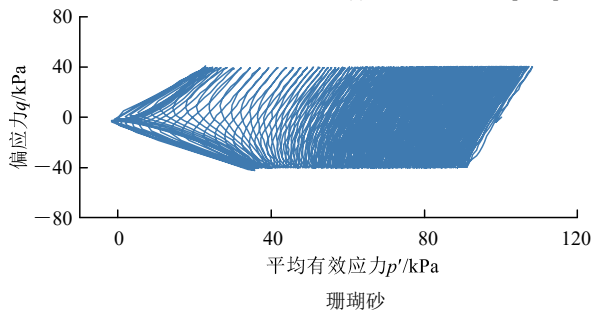
化。对应地，应力路径逐步向左收缩至原点，偏应力 - 应变曲线滞回圈逐渐扩张直至塌缩，同时应变随循环突增，表明试样强度丧失。在该试验条件下，相同工况下石英砂达到液化需要比珊瑚砂更少的循环次数，且达到液化时，石英砂试样发生更大的轴向变形，最大应变幅值约为 10%，而珊瑚砂仅为 4%，显示出珊瑚砂试样更高的动强度。

在针对砂土的常规尺寸循环三轴试验中，橡皮膜效应对珊瑚砂试样以及高 D_r 的石英砂试样的孔压增长限制显著，将显著高估抗液化强度，误差高



(a) 超孔压随循环振次变化曲线

(a) Curves of excess pore pressure varying with the number of cycles



(b) 循环有效应力路径

(b) Cyclic effective stress path

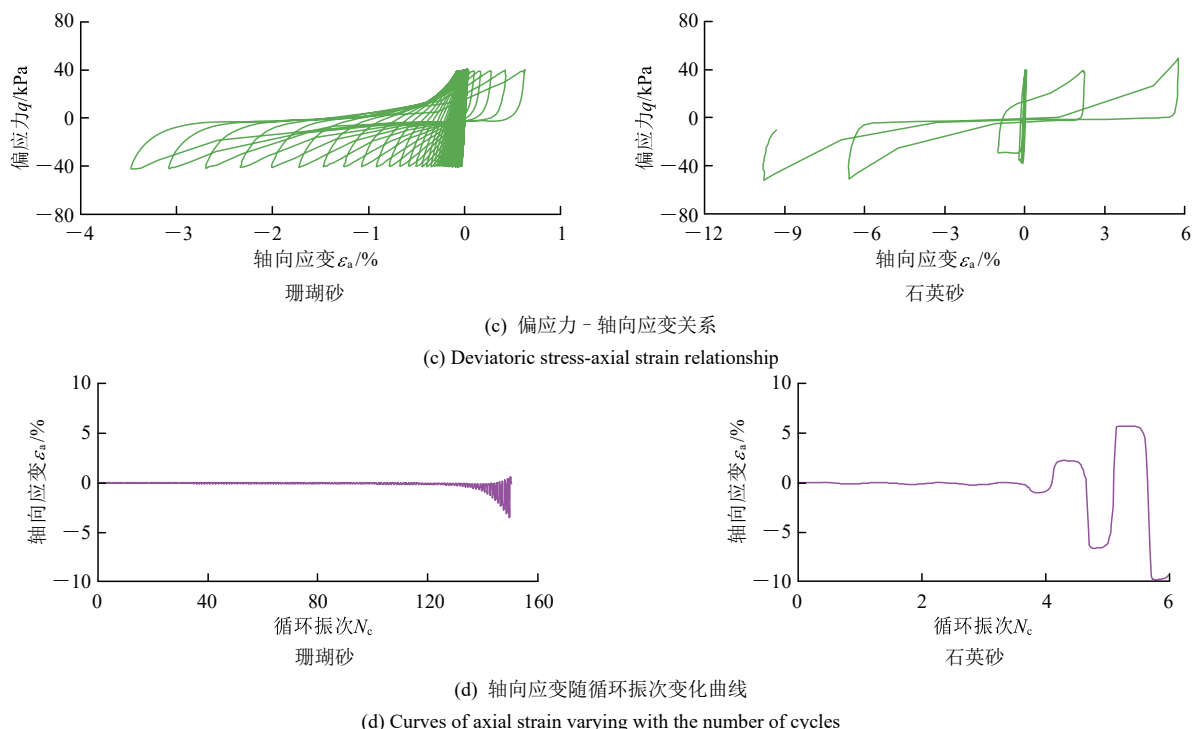


图 4 珊瑚砂和石英砂的典型液化试验结果($p'_0 = 100 \text{ kPa}$, $D_r = 50\%$, $CSR = 0.20$)
 Fig.4 Typical liquefaction test results of coral sand and quartz sand($p'_0 = 100 \text{ kPa}$, $D_r = 50\%$, $CSR = 0.20$)

达 26%~51%，需对试样的孔压增量进行膜顺变性修正^[45]。在本研究中，为了保证试验结果的可靠性，均使用 Y. D. Wang 等^[45]推荐的方法对孔压结果进行了修正。图 5 为修正后的抗液化强度曲线。可以

看出，珊瑚砂与石英砂的抗液化强度皆与 D_r 呈正相关，石英砂尤为明显。

根据如图 5 所示的液化强度曲线，结合矩震级 M_w 与等效应力循环振次 N_{eq} 关系(见表 3^[53-56])，可以分别得到相应震级下的液化临界 CSR 值，也就是 CRR 值，结果如表 4 所示(表中， V_{s-lab} 为相同 D_r 下 4 次弯曲元试验测得的 V_s 均值， $CRR_{N_{eq-lab}}$ 为通过室内三轴液化试验获得的对应等效循环振次下(N_{eq})的 CRR)。同样的，将表 2 中通过弯曲元系统测定的相同 D_r 的试样在 p'_0 下的 V_s 结果均值也对应置于表 4 中。可以看出珊瑚砂的 V_{s-lab} 显著高于石英砂，且珊瑚砂在最低 D_r 下的 V_{s-lab} 也比石英砂最高 D_r 状态下的 V_{s-lab} 高。

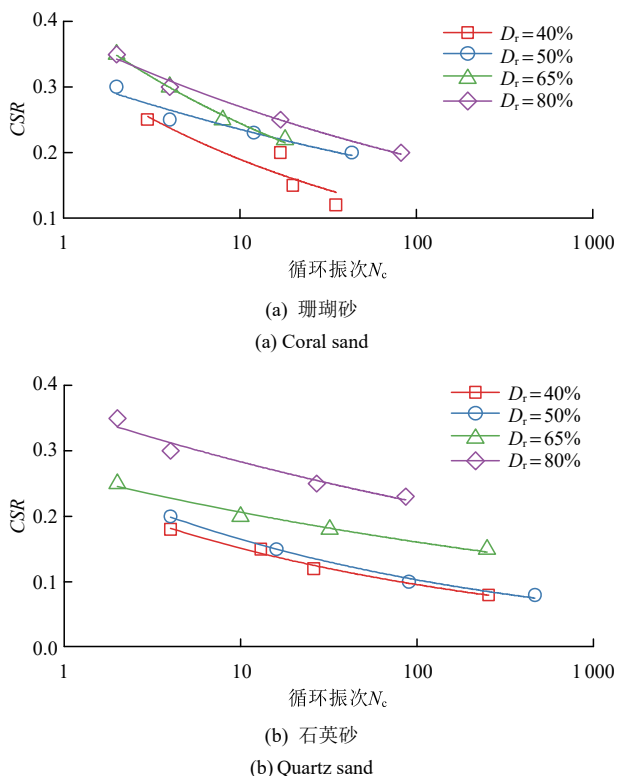


图 5 修正后的抗液化强度曲线
 Fig.5 Corrected liquefaction resistance curves

3.2 剪切波速与抗液化强度(V_s -CRR)关系模型

R. D. Andrus 等^[24, 57]现有研究表明，石英砂的

表 3 矩震级与等效循环振次的对应关系^[53-56]
 Table 3 The corresponding relationship between moment magnitude and equivalent number of cyclic vibrations^[53-56]

M_w	N_{eq}
6.0	5
6.5	8
7.0	12
7.5	20
8.0	30

表 4 珊瑚砂与石英砂的剪切波速与对应的抗液化强度值
Table 4 V_s and corresponding CRR values of coral and quartz sand

材料 (material)	$V_{s-lab} /$ ($m \cdot s^{-1}$)	CRR_{5-lab}	CRR_{8-lab}	CRR_{12-lab}	CRR_{20-lab}	CRR_{30-lab}
珊瑚砂	236.1	0.225	0.200	0.181	0.159	0.144
	248.1	0.257	0.242	0.230	0.216	0.205
	252.8	0.288	0.262	0.242	0.219	0.203
	253.8	0.299	0.279	0.263	0.244	0.229
石英砂	211.8	0.174	0.158	0.146	0.132	0.122
	213.0	0.188	0.171	0.158	0.143	0.132
	214.4	0.222	0.211	0.202	0.192	0.184
	226.2	0.305	0.290	0.278	0.263	0.252

剪切波速与抗液化强度有着良好的相关性。姜朴和孙德安^[58]的试验结果表明，液化时的动剪应力与振动前的剪切波速之间有良好的关系，且不受固结比和固结压力的影响，并提出可只用少数几个试件确定这种关系，进而再作液化判别方法的构建。这也是在缺少震害案例原位测试资料的现状下，本文通过试验构建珊瑚砂抗液化强度表征关系的理论基础之一。石兆吉和郁寿松^[59]在对前人试验研究结果总结后发现，砂土重塑或扰动试样的剪切波速与抗液化强度之间的关系与用冰冻法取出的高质量原状样的相同。因此，研究将根据表 4 中的结果寻找珊瑚砂的抗液化强度与剪切波速之间的表征关系。

对于 V_s ，考虑到通过 GDS 弯曲元测试系统得到的 V_s 是在均等固结下进行的，为了对现场应力条件需要对测试结果进行各向异性修正。C. D. P. Baxter 等^[57]提出了有效围压与初始有效应力同为 σ'_0 条件下室内 V_s 试验结果与现场修正剪切波速 $V_{s1-field}$ 的关系：

$$V_{s1-field} = V_{s-lab} K_0^m (p_a / \sigma'_0)^{2m} \quad (3)$$

式中： $p_a = 100 \text{ kPa}$ 或一个大气压； K_0 为侧向静止土压力系数，对砂土等无黏性土 K_0 的范围通常为 $0.40 \sim 0.55$ ，对于可能液化的自然沉积水平场地，

$K_0 = 0.5$ ； m 为应力指数，对多数土而言， $m = 0.125$ ^[24]。对于在 100 kPa 下进行室内试验测试得到的试验结果，式(3)可以变换为

$$V_{s1-field} = V_{s-lab} K_0^m \quad (4)$$

对于室内三轴试验获得的 $CRR_{Neq-lab}$ ，由于单元体循环试验的应力状态与水平自由场地土层的应力状态之间的差异，需要对液化试验结果进行相应的修正。H. B. Seed^[60]给出了自由场地土层的循环抗力比 CRR_{M_w} 与室内三轴液化试验所获得的循环抗力比 $CRR_{Neq-lab}$ 之间的对应关系：

$$CRR_{M_w} = 0.9C_r CRR_{Neq-lab} \quad (5)$$

式中： C_r 为修正系数，取值与密实度有关，范围 $0.55 \sim 0.80$ ，对中等密实度砂土可取 0.65 。

根据式(4)，(5)以及表 4 中的室内试验数据，可以计算得到 CRR_{M_w} 和 $V_{s1-field}$ ，如图 6 所示。同时，研究发现， CRR_{M_w} 和 $V_{s1-field}$ 二者具有较好的相关性，二者关系为

$$CRR_{M_w} = k_1 \exp(k_2 V_{s1-field}) \quad (6)$$

式中： k_1 ， k_2 为模型参数。式(6)拟合优度 R^2 均在 0.87 以上。另一方面，珊瑚砂的拟合优度 R^2 普遍高于石英砂，达到 0.90 以上，说明珊瑚砂的抗液化强度与剪切波速有着更好的相关性。

经拟合分析发现，参数 k_1 ， k_2 均与矩震级 M_w 有着很好的相关性，拟合优度 R^2 均达到 0.99 以上，对于珊瑚砂：

$$k_1 = 4.143 \exp(-1.191 M_w) \quad (7)$$

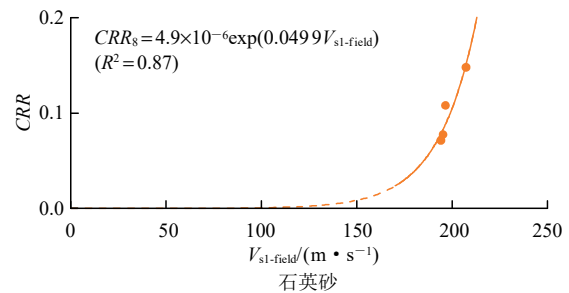
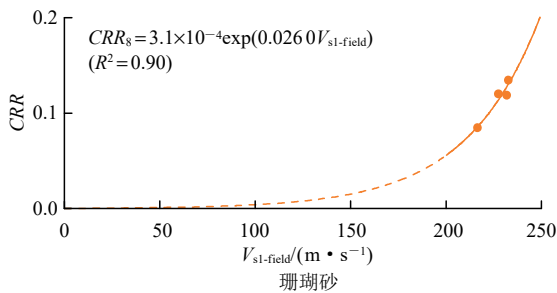
$$k_2 = 0.0045 M_w - 0.0101 \quad (8)$$

对于石英砂：

$$k_1 = 5.791 \exp(-1.175 M_w) \quad (9)$$

$$k_2 = 0.0053 M_w + 0.0079 \quad (10)$$

根据式(6)~(10)，可以得到珊瑚砂与石英砂的剪切波速与抗液化强度关系(V_s - CRR)模型，模型参数仅为原位土层的修正剪切波速 $V_{s1-field}$ 及对应的地



(a) $M_w = 8.0$

(a) Moment magnitude is 8.0

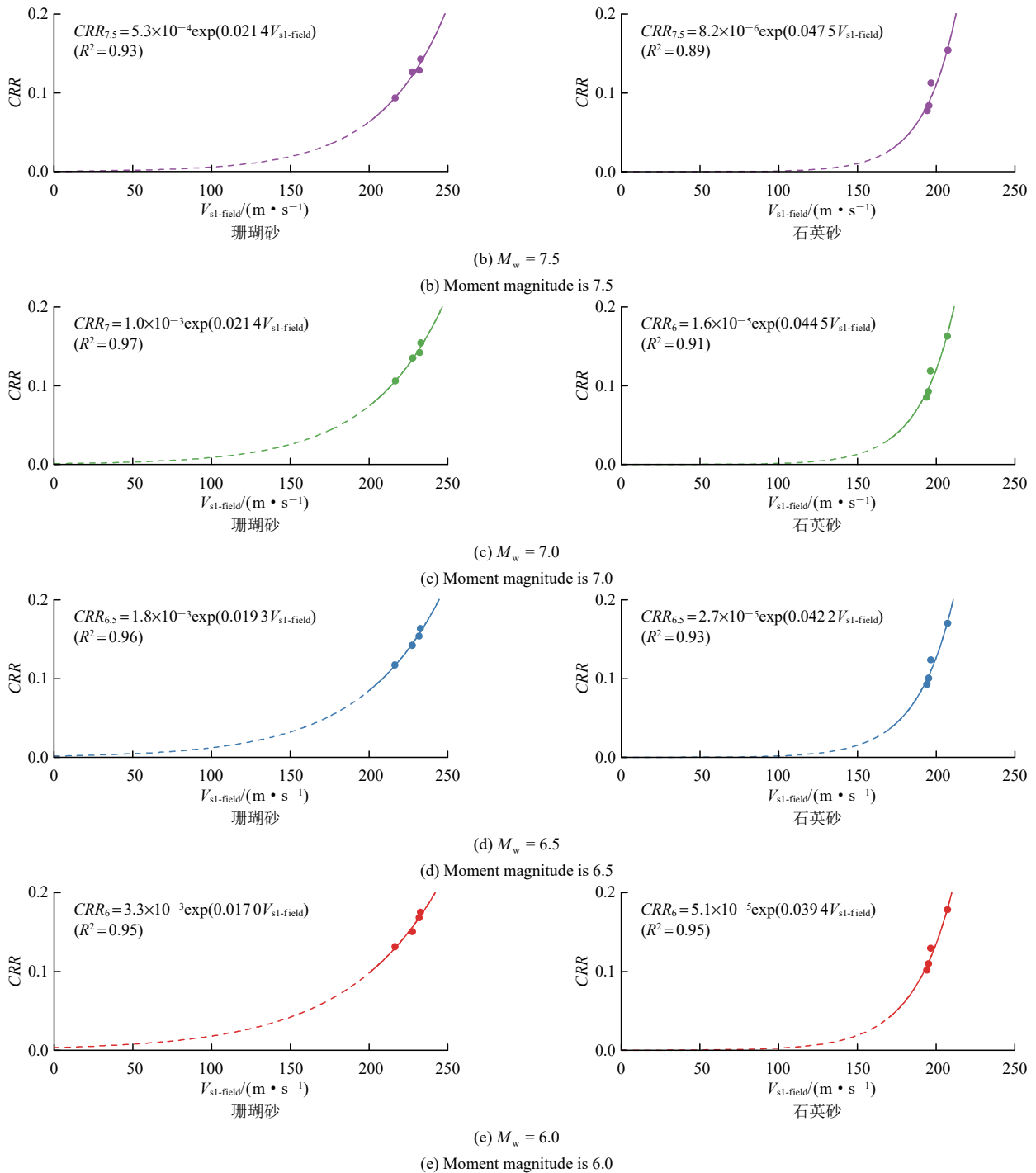


图 6 珊瑚砂与石英砂剪切波速与抗液化强度关系回归分析

Fig.6 Regression analysis of the relationship between shear wave velocity and liquefaction resistance for coral and quartz sand

震矩震级 M_w ，对于珊瑚砂：

$$CRR_{M_w} = 4.143 \exp[(0.0045M_w - 0.0101)V_{sl-field} - 1.191M_w] \quad (11)$$

对于石英砂：

$$CRR_{M_w} = 5.791 \exp[(0.0053M_w + 0.0079)V_{sl-field} - 1.175M_w] \quad (12)$$

3.3 模型验证

为了验证本文 V_s -CRR 模型构建方法的合理性，同时间接验证珊瑚砂 V_s -CRR 模型的可靠性，将基

于相同方法路线构建的石英砂模型应用于 1989 年洛马普列塔地震的 Treasure Island 消防站液化场地，并与目前陆源土地中常用的基于 V_s 的 CRR 计算方法进行对比。该场地的 V_s 通过现场交叉孔测试获得^[61]。CSR 的计算中假设水位以上土体密度为 1.76 Mg/m³，水位以下为 1.92 Mg/m³，并采用了 H. B. Seed 和 I. M. Idriss^[54]提出的平均 r_d 值。根据 1989 年地震期间在消防站记录的两水平向峰值加速度 0.16 g, 0.11 g^[62]，取其几何平均值 0.13 g 作为地表

峰值加速度 a_{max} 。图 7 所示的土层类型与细颗粒含量(FC)则基于 P. de Alba 等^[63-64]提供的资料。CRR 值分别采用 R. D. Andrus 和 K. H. Stokoe II^[24]提出的 Andrus 模型、R. Kayen 等^[23]提出的 Kayen 模型以及本文提出的石英砂方法(式(12))进行计算，其中，Andrus 模型和 Kayen 模型计算式分别为

$$CRR = 0.022(V_{sl} / 100)^2 + 2.8 \cdot [1 / (V_{slc} - V_{sl}) - 1 / V_{slc}] \quad (13)$$

$$CRR = \exp[(0.0073V_{sl})^{2.8011} - 2.6168 \ln M_w - 0.0099 \ln \sigma'_{v0} + 0.0028FC - 0.4809\Phi^{-1}(P_L)] / 1.946 \quad (14)$$

式中： V_{sl} 为修正剪切波速； σ'_{v0} 为现场初始有效应力； V_{slc} 为液化层 V_{sl} 上限值； Φ 为累积正态分布函数； P_L 为液化概率，当使用临界判据时， $P_L = 0.5$ 。

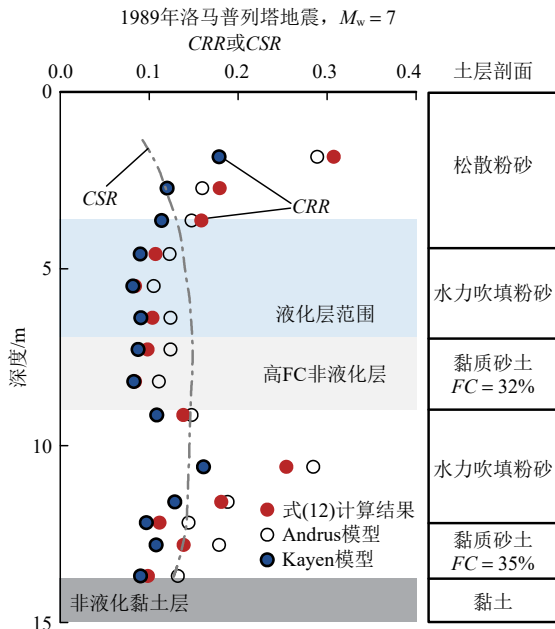


图 7 石英砂模型与已有模型案例对比

Fig.7 Comparison of the quartz sand model with existing models

如图 7 所示，在相同深度条件下，本文提出的基于石英砂 V_s -CRR 模型计算得到的 CRR 值总体上与 Andrus 及 Kayen 模型所得结果相近。在 3 种模型结果中，4.5~9 m 深度范围的 CRR 曲线均位于 CSR 曲线的左侧，显示该区间存在液化发生的可能。然而，在 12~14 m 深度范围，所提出的关系模型(式(11))与 Kayen 方法计算的 CRR 值均落在 CSR 曲线的左侧且非常接近，而 Andrus 模型得到的 CRR 值则位于 CSR 曲线之上或右侧，显示了 3 种方法结果之间的差异。鉴于所提出的关系模型是基于清洁石英砂的室内试验而建立的，其对细颗粒含量

(FC)为 30%以上黏性砂层的适用性可能存在局限。3 种模型结果一致表明在 4.5~9 m 深度范围可能发生液化，但依据规范^[65]，7~9 m 以及 12~14 m 范围由于存在细颗粒含量高达 32%~35%的黏性砂层，可判定为非液化土体。总体而言，本文提出的基于石英砂 V_s -CRR 模型在陆域场地液化评价中与常用方法结果表现出较好的一致性。

3.4 珊瑚砂模型应用示例

基于节 3.3 的实例分析，可以初步认为本文提出的珊瑚砂剪切波速与抗液化强度关系模型是可靠的。由于目前已知的历史上有现场 V_s 数据的珊瑚砂地震液化事件只有 2006 年夏威夷地震，因此使用该地震实例进行进一步验证。

2006 年夏威夷地震(M_w 6.7)，震源深度为 29 km，距液化场地的震中距离约 20 km，作用于场地的峰值地表加速度(PGA)约为 0.4 g，场地平均地下水位为 1.85 m。液化所致破坏主要集中在 Kawaihae 港^[6, 8]。该场地为人工填筑的珊瑚填土区，被称为“珊瑚平台”，表明其土层剖面由相对均一的珊瑚土组成。震后在 Kawaihae 港广泛观测到喷砂冒水现象，值得注意的是，其中部分喷出物为砾石粒径，与汶川地震中在砾质土中观测到的液化现象类似^[66]。液化造成了道路、码头及地下输油管道的损坏。调查表明，发生液化的土层位于埋深 3.6~6.7 m 的饱和珊瑚土层^[2]。在迄今为止有记载的 3 次珊瑚土液化事件中，夏威夷地震是唯一一例公开提供场地 V_s 数据的案例，该数据集为展示并验证珊瑚砂 V_s -CRR 的适用性提供了案例资料。

地质勘查及液化现象观测表明，场地内存在大量砾质土层，但其具体分布尚不明确。此外，已有研究表明，砾质珊瑚土在相似埋深条件下的 V_s 显著高于珊瑚砂，其差值可达 10%~20%^[29]。为便于对所提出的珊瑚砂液化判别方法进行对比分析，本案例研究选取 H. Shahnazari 等^[2]提供的 Kawaihae 港震前的 V_s 剖面的下限作为实测 V_s (见图 8)，旨在优先反映场地中珊瑚砂层的 V_s ，而非更具有更高 V_s 的含砾珊瑚土层的数值。

图 8 展示了基于本文提出的珊瑚砂关系模型计算得到的 CRR 值，可以看出，模型估算的液化深度范围为 2~9 m，其余深度范围为非液化层。该结果与 H. Shahnazari 等^[2]基于理论分析与震害调查所确定的液化范围总体一致，评估结果略保守。但是，本模型基于珊瑚砂室内试验建立，并未考虑夏威夷液化场地含砾量对珊瑚土 V_s 的影响。在将该方法应用于一般珊瑚土场地时，应考虑对砾石含量进行修

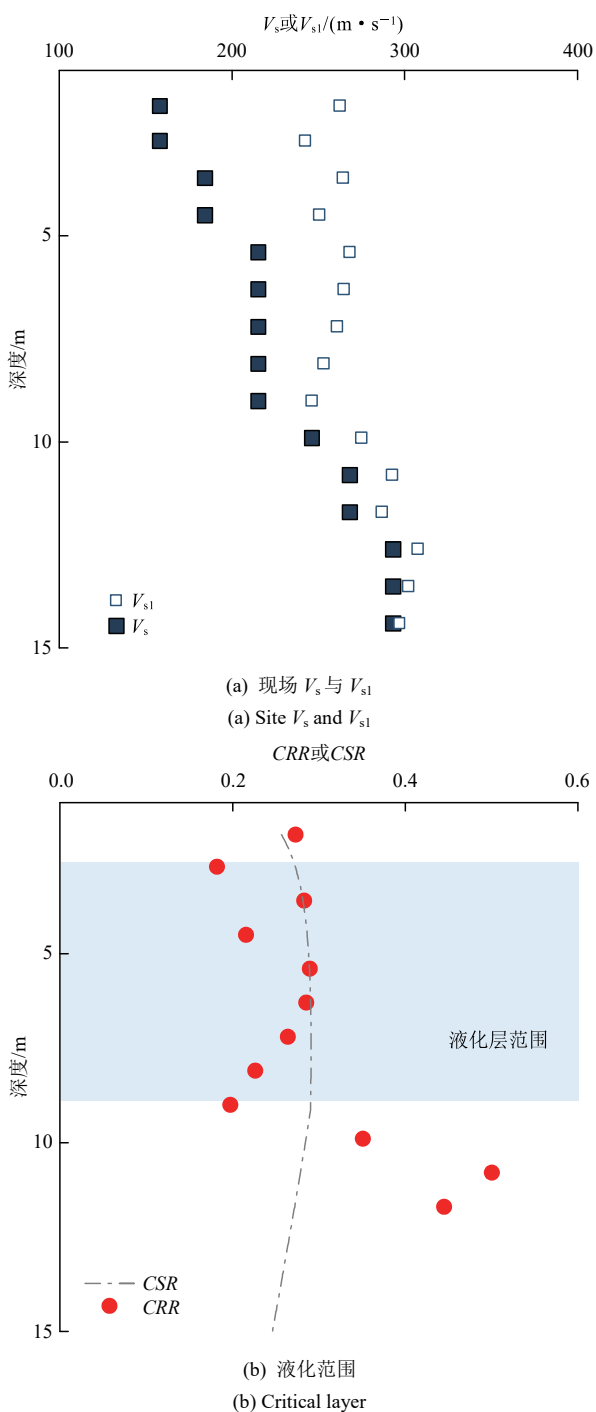


图 8 珊瑚砂模型 2006 年夏威夷地震应用示例

Fig.8 Application example of coral sand model on 2006 Hawaii earthquake

正。相比之下，考虑使用 Andrus 或 Kayen 模型时，由于该场地 V_{s1} 皆高于或接近液化层 V_{s1} 上限值 220 m/s，因此所有深度都将被判别为非液化层，产生严重误判。总体而言，本文提出的珊瑚砂 V_s -CRR 模型在研究案例中表现出较好的工程适用性。

3.5 珊瑚砂场地液化判别公式

在国内的工程实践中，习惯上以临界 V_s 作为液

化判据，例如石兆吉等^[67]基于多次历史震害现场 V_s 提出的临界 V_s 计算公式：

$$V_{s, ci} = V_{s, 0} (d_s - 0.013 3d_s^2)^{0.5} [1 - 0.185(d_w / d_s)] \quad (15)$$

式中： $V_{s, ci}$ 为临界剪切波速，当现场实测剪切波速小于该值时判定为液化； $V_{s, 0}$ 为剪切波速基准值，在 7, 8, 9 度时分别取 63, 89 和 125 m/s； d_s 为土层深度； d_w 为地下水位深度。式(15)经细微调整后曾进入规范^[27]。考虑我国岛礁及港口等珊瑚砂场地工程应用，基于式(11)构建珊瑚砂场地的液化临界 V_s 计算公式。

根据修订后的珊瑚砂 Hardin 公式^[33]，可以得到现场实测不同深度 d 下的剪切波速 $V_{swd-field}$ ：

$$V_{swd-field} = \left(\frac{\sigma'_v}{p_a} \right)^{0.277} V_{s1-field} \quad (16)$$

式中： σ'_v 上覆有效应力。考虑式(11)，(16)，并结合室内试验测得的珊瑚砂天然密度、饱和重度以及地下水位 h_w ，可以得到现场土层的抗液化强度 CRR_{M_w} ：

$$CRR_{M_w} = 4.143 \exp \left[(0.004 5M_w - 0.010 1) \cdot \left(\frac{3}{1.9d + 2h_w} \right)^{0.277} V_{swd-field} - 1.191M_w \right] \quad (17)$$

式中： h_w 为地下水位。由于珊瑚砂难以取得无扰动样品，本文采用重塑试样测定天然密度与饱和重度。试样相对密度取 50%，对应中等密实状态，天然密度取含水率 50% 的情况。所得结果可代表典型珊瑚砂的平均物理特征。

至于地震发生时的循环剪应力荷载，T. L. Youd 和 I. M. Idriss^[53]提出地震发生时土层中的循环剪应力比应根据下式计算：

$$CSR_{M_w} = CSR / MSF \quad (18)$$

式中： CSR_{M_w} 为经震级修正后的循环剪应力比； MSF 为震级缩放因子，由下式计算：

$$MSF = 10^{2.24} / M_w^{2.56} \quad (19)$$

式(18)的 CSR 为现场特定深度土层中的等效循环剪应力，根据 Seed 简化方法计算^[54]：

$$CSR = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma'_v}{\sigma'_v} r_d \quad (20)$$

式中： a_{max} 为地表峰值加速度，根据规范^[65]取值； g 为重力加速度； σ'_v 为上覆总应力； r_d 为动剪应力折减系数，采用王克等^[68]提出的方法根据土层深

度 d 分段计算:

$$r_d = \begin{cases} 1 - 0.007 \ 65d & (d \leq 9.15 \text{ m}) \\ 1.174 - 0.026 \ 7d & (9.15 \text{ m} < d \leq 23 \text{ m}) \\ 0.744 - 0.008d & (23 \text{ m} < d \leq 30 \text{ m}) \\ 0.5 & (30 \text{ m} < d) \end{cases} \quad (21)$$

根据以上分析, 结合式(18)~(21)可以得到地震发生时珊瑚砂场地不同深度下的 CSR_{M_w} :

$$CSR_{M_w} = \begin{cases} \frac{\frac{a_{\max}}{g} dM_w^{2.56} (12.675 - 0.097d)}{1 \ 737.8h_w + 1 \ 650.9d} & (h_w < d \leq 9.15) \\ \frac{\frac{a_{\max}}{g} dM_w^{2.56} (14.880 - 0.338d)}{1 \ 737.8h_w + 1 \ 650.9d} & (9.15 < d \leq 23) \\ \frac{\frac{a_{\max}}{g} dM_w^{2.56} (9.430 - 0.101d)}{1 \ 737.8h_w + 1 \ 650.9d} & (23 < d \leq 30) \\ \frac{6.338 \frac{a_{\max}}{g} dM_w^{2.56}}{1 \ 737.8h_w + 1 \ 650.9d} & (d > 30) \end{cases} \quad (22)$$

令式(17)与(22)相等, 即当 CSR_{M_w} 与 CRR_{M_w} 相等时, 可以得到珊瑚砂场地土层液化临界剪切波速 V_{sc} 计算公式:

$$V_{sc} = (\ln A_1 - \ln A_2 + 1.191M_w) A_3 \quad (23)$$

其中,

$$A_1 = \begin{cases} \frac{a_{\max}}{g} dM_w^{2.56} (12.675 - 0.097d) & (h_w < d \leq 9.15) \\ \frac{a_{\max}}{g} dM_w^{2.56} (14.880 - 0.338d) & (9.15 < d \leq 23) \\ \frac{a_{\max}}{g} dM_w^{2.56} (9.430 - 0.101d) & (23 < d \leq 30) \\ 6.338 \frac{a_{\max}}{g} dM_w^{2.56} & (d > 30) \end{cases} \quad (24)$$

$$A_2 = 7 \ 199.7h_w + 6 \ 839.7d \quad (25)$$

$$A_3 = (0.011 \ 5M_w - 0.025 \ 9)^{-1} (1.9d + 2h_w)^{0.277} \quad (26)$$

式(23)由本文提出的 V_s - CRR 关系模型(式(11))结合工程常用判别流程经数学推导直接得到, 其计

算结果与 V_s - CRR 模型的液化判别结论保持一致。

4 结 论

本研究针对南海岛礁及港口工程广泛采用珊瑚砂作为地基填料, 而其地震场地液化判别手段尚不完善的现实问题, 系统开展了饱和珊瑚砂剪切波速与抗液化强度关系的试验与模型研究。通过室内动三轴-弯曲元联合试验, 全面获取了南海珊瑚砂及对照组石英砂的抗液化强度与剪切波速参数, 进一步建立了具有工程适用性的珊瑚砂 V_s - CRR 定量关系模型, 并结合典型历史地震液化案例对模型的可靠性与适用性进行了系统验证。在此基础上, 推导了考虑震级影响的珊瑚砂场地液化临界剪切波速计算公式。研究为南海岛礁及港口珊瑚砂地基的地震液化判别与抗震设计提供了科学依据和工程参考。

主要结论如下:

(1) 通过室内动三轴-弯曲元联合试验, 建立了饱和珊瑚砂的剪切波速 V_s 与抗液化强度 CRR 之间的定量关系模型。试验结果表明, 珊瑚砂的 V_s 与 CRR 具有较好的相关性, 拟合优度 R^2 普遍在 0.90 以上; 相比之下, 同级配石英砂的相关性略低, 这表明采用 V_s 作为珊瑚砂场地液化判别参数更具合理性。在相同 CRR 下珊瑚砂所对应的 V_s 显著高于石英砂, 这一现象反映出珊瑚砂剪切刚度和抗液化性能的特殊性, 表明珊瑚砂与陆源砂之间 V_s 存在系统性差异。

(2) 基于石英砂试验结果建立的 V_s - CRR 模型应用于 1989 年洛马普列塔地震场地时, 模型计算的 CRR 分布与 R. Kayen 等^[23-24]的现有方法基本一致, 均能识别出 4.5~9.0 m 深度范围的液化可能性, 验证了该模型的适用性和可靠性。同时, 也进一步说明了本研究采用的模型构建技术路线具有科学性和可推广性。

(3) 针对 2006 年夏威夷 Kawaihae 港典型珊瑚砂液化场地, 本文提出的珊瑚砂 V_s - CRR 关系模型能够合理预测珊瑚砂层的液化深度, 与震后现场调查确定的液化范围相符, 模型评估略偏保守。相比之下, 目前常用的 V_s 判别方法将该场地全部土层误判为非液化, 显著高估了场地安全性。上述对比验证表明, 本文提出的珊瑚砂 V_s - CRR 关系模型具有良好的可靠性和工程适用性, 可更准确地判别珊瑚砂场地的液化风险。

(4) 需要指出的是, 若场地存在极细颗粒夹层

(例如粉砂质夹层)或含砾量显著高于本试验材料的层段, 则该模型的适用性可能降低, 此类情况应通过现场及室内试验或耦合数值分析进一步校核。同时, 未来研究宜基于本模型发展考虑含砾量影响的宽级配珊瑚土关系模型, 以更广泛地适应珊瑚土吹填场地的实际情况。

参考文献(References):

- [1] 袁晓铭, 张文彬, 段志刚, 等. 珊瑚土工程场地地震液化特征解析[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(增 2): 3 799 - 3 811.(YUAN Xiaoming, ZHANG Wenbin, DUAN Zhigang, et al. Analysis for characteristics of seismic liquefaction in engineering sites of coralline soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(Supp.2): 3 799 - 3 811.(in Chinese))
- [2] SHAHNAZARI H, JAFARIAN Y, TUTUNCHIAN M A, et al. Probabilistic assessment of liquefaction occurrence in calcareous fill materials of Kawaihae Harbor, Hawaii[J]. International Journal of Geomechanics, 2016, 16(6): 05016001.
- [3] 马成昊, 朱长歧, 瞿 茹, 等. 中国南海珊瑚砂的多尺度颗粒形貌特征分析[J]. 岩土力学, 2023, 44(增 1): 117 - 126.(MA Chenghao, ZHU Changqi, QU Ru, et al. Multi-scale particle morphology analysis of coral sand in South China Sea[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(Supp.1): 117 - 126.(in Chinese))
- [4] 傅 华, 凌 华, 蔡正银. 粗颗粒土颗粒破碎影响因素试验研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2009, 37(1): 75 - 79.(FU Hua, LING Hua, CAI Zhengyin. Influencing factors for particle breakage of coarse grained soil[J]. Journal of Hohai University: Natural Science, 2009, 37(1): 75 - 79.(in Chinese))
- [5] 蔡正银, 陈元义, 朱 洵, 等. 级配珊瑚砂颗粒破碎与变形特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(4): 661 - 670.(CAI Zhengyin, CHEN Yuanyi, ZHU Xun, et al. Influences of gradation on particle breakage and deformation characteristics of coral sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(4): 661 - 670.(in Chinese))
- [6] CHOCK G, ROBERTSON I, NICHOLSON P, et al. Compilation of observations of the October 15, 2006, Kiholo Bay(M_w 6.7) and Mahukona(M_w 6.0) earthquakes, Hawaii[J]. Earthquake Engineering Research Institute, 2006, 31: 1 - 53.
- [7] GREEN R A, OLSON S M, COX B R, et al. Geotechnical aspects of failures at Port-au-Prince seaport during the 12 January 2010 Haiti earthquake[J]. Earthquake Spectra, 2011, 27(Supp.1): 43 - 65.
- [8] MEDLEY E W. Geological engineering reconnaissance of damage caused by the October 15, 2006 Hawaii earthquakes[J]. ISSMGE International Journal of Geotechnical Case Histories, 2007, 1(2): 89 - 135.
- [9] MEJIA L H, YEUNG M R. Liquefaction of coralline soils during the 1993 Guam earthquake[C]// Proceedings of the ASCE Earthquake-Induced Movements and Seismic Remediation of Existing Foundations and Abutments. San Diego, California: [s. n.], 1995: 33 - 48.
- [10] RATHJE E, BACHHUBER J, COX B, et al. Geotechnical engineering reconnaissance of the 2010 Haiti earthquake[R]. [S. l.]: GEER Association, 2010.
- [11] SWAN S W, HARRIS S K. The Island of Guam earthquake of August 8, 1993[R]. Buffalo: National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York, 1993.
- [12] ZHOU Y G, SUN Z B, CHEN J, et al. Shear wave velocity-based evaluation and design of stone column improved ground for liquefaction mitigation[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2017, 16(2): 247 - 261.
- [13] ZHOU Y G, XIA P, LING D S, et al. Liquefaction case studies of gravelly soils during the 2008 Wenchuan earthquake[J]. Engineering Geology, 2020, 274: 105691.
- [14] YANG Y, WEI Y T. A new shear wave velocity-based liquefaction probability model using logistic regression: emphasizing fines content optimization[J]. Applied Sciences, 2024, 14(15): 6 793.
- [15] 杨 洋, 孙 锐. 基于剪切波速的液化可能性等级评估表法[J]. 岩土力学, 2023, 44(增 1): 634 - 644.(YANG Yang, SUN Rui. Liquefaction probability criteria table based on shear wave velocity[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(Supp.1): 634 - 644.(in Chinese))
- [16] SHEN M F, CHEN Q S, ZHANG J, et al. Predicting liquefaction probability based on shear wave velocity: an update[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2016, 75(3): 1 199 - 1 214.
- [17] CHEN G X, KONG M Y, KHOSHNEVISAN S, et al. Calibration of V_s -based empirical models for assessing soil liquefaction potential using expanded database[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 78(2): 945 - 957.
- [18] CAI G J, LIU S Y, PUPPALA A J. Liquefaction assessments using seismic piezocone penetration(SCPTU) test investigations in Tangshan region in China[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2012, 41: 141 - 150.
- [19] 周燕国, 周鑫辉, 桑毅佳, 等. 考虑沉积时间效应的原位砂土抗液化强度剪切波速评价[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(增 2): 19 - 24.(ZHOU Yanguo, ZHOU Xinhui, SANG Yijia, et al. Shear wave velocity-based evaluation of liquefaction resistance of in-situ sand with aging effects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(Supp.2): 19 - 24.(in Chinese))
- [20] DOBRY R, BORCHERDT R D, CROUSE C B, et al. New site coefficients and site classification system used in recent building seismic code provisions[J]. Earthquake Spectra, 2000, 16(1): 41 - 67.
- [21] WU Q, LIU Q F, ZHUANG H Y, et al. Experimental investigation of dynamic shear modulus of saturated marine coral sand[J]. Ocean Engineering, 2022, 264: 112412.
- [22] LIANG K, CHEN G X, DU X L, et al. A unified formula for small-strain shear modulus of sandy soils based on extreme void ratios[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2023, 149(2): 04022127.
- [23] KAYEN R, MOSS R E S, THOMPSON E M, et al. Shear-wave velocity-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(3): 407 - 419.
- [24] ANDRUS R D, STOKOE II K H. Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(11): 1 015 - 1 025.

- [25] American Society of Civil Engineers. ASCE/SEI 7-22 Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures[S]. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, 2022.
- [26] National Institute of Building Sciences. FEMA 450 NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures[S]. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency, 2004.
- [27] 中华人民共和国行业标准编写组. TBJ1—88 建筑地基基础设计规范[S]. 天津: 天津市住房和城乡建设委员会, 1988.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. TBJ1—88 Code for Design of Building Foundation[S]. Tianjin: Tianjin Housing and Urban-Rural Construction Commission, 1988.(in Chinese))
- [28] 汪云龙, 袁晓铭, 孙锐, 等. 珊瑚吹填土初始剪切模量试验研究[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2017, 47(10): 36 - 41. (WANG Yunlong, YUAN Xiaoming, SUN Rui, et al. Experimental investigation on initial shear modulus of coral reclaimed soil[J]. Periodical of Ocean University of China, 2017, 47(10): 36 - 41.(in Chinese))
- [29] 郭楨, 蒲建, 卢劲楷, 等. 南海西沙岛礁非饱和珊瑚砂共振柱-弯曲元试验研究[J]. 工程地质学报, 2023, 31(5): 1 552 - 1 562. (GUO Zhen, PU Jian, LU Jinkai, et al. Resonant column and bender element tests of unsaturated coral sand on Xisha islands in South China Sea[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(5): 1 552 - 1 562. (in Chinese))
- [30] 施周恒, 赵力左, 陈鹏骏, 等. 非等向固结条件下含砾粒珊瑚土动力液化特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2025, 47(增 1): 132 - 137. (ZHOU Shiheng, ZHAO Lizuo, CHEN Pengjun, et al. Cyclic liquefaction behavior of coral sand-gravel soil under anisotropic consolidation conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2025, 47(Supp.1): 132 - 137.(in Chinese))
- [31] 史金权, 肖杨, 刘汉龙, 等. 钙质砂小应变初始剪切模量试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(2): 324 - 333.(SHI Jinquan, XIAO Yang, LIU Hanlong, et al. Experimental study on small-strain shear modulus of calcareous sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(2): 324 - 333.(in Chinese))
- [32] 刘汉龙, 张宇, 郭伟, 等. 微生物加固钙质砂动孔压模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(4): 790 - 801.(LIU Hanlong, ZHANG Yu, GUO Wei, et al. A prediction model of dynamic pore water pressure for MICP-treated calcareous sand[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(4): 790 - 801.(in Chinese))
- [33] WANG Y D, WANG Y L, LIU H D, et al. Experimental investigation of influencing factors on shear wave velocity in coral sand[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2026, 200: 109910.
- [34] 虞海珍, 赵文光, 汪稔, 等. 复杂应力状态下钙质砂的动强度[J]. 华中科技大学学报: 城市科学版, 2005, 22(1): 40 - 43.(YU Haizhen, ZHAO Wenguang, WANG Ren, et al. Dynamic strength of carbonate sand in complex stress state[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Urban Science, 2005, 22(1): 40 - 43.(in Chinese))
- [35] 虞海珍, 汪稔. 钙质砂动强度试验研究[J]. 岩土力学, 1999, 20(4): 6 - 11.(YU Haizhen, WANG Ren. The cyclic strength test research on calcareous sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(4): 6 - 11.(in Chinese))
- [36] 许成顺, 王冰, 杜修力, 等. 循环加载频率对砂土液化模式的影响试验研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(11): 109 - 118.(XU Chengshun, WANG Bing, DU Xiuli, et al. Experimental study on effect of cyclic loading frequency on liquefaction mode of sand[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(11): 109 - 118.(in Chinese))
- [37] 秦悠, 杜歆宇, 马维嘉, 等. 不同初始剪应力下饱和珊瑚砂的液化特性[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2025, 46(2): 197 - 204.(QIN You, DU Xinyu, MA Weijia, et al. Liquefaction characteristics of saturated coral sand under various initial shear stresses[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2025, 46(2): 197 - 204.(in Chinese))
- [38] 吴琪, 王路阳, 刘启菲, 等. 基于剪切应变特征的饱和珊瑚砂超静孔压发展模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(10): 2 091 - 2 099.(WU Qi, WANG Luyang, LIU Qifei, et al. Experimental study on development model of excess pore pressure for saturated coral sand based on shear strain characteristics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(10): 2 091 - 2 099.(in Chinese))
- [39] 马维嘉, 陈国兴, 吴琪. 复杂加载条件下珊瑚砂抗液化强度试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(2): 535 - 542.(MA Weijia, CHEN Guoxing, WU Qi. Experimental study on liquefaction resistance of coral sand under complex loading conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(2): 535 - 542.(in Chinese))
- [40] 刘抗, 陈国兴, 吴琪, 等. 循环加载方向对饱和珊瑚砂液化特性的影响[J]. 岩土力学, 2021, 42(7): 1 951 - 1 960.(LIU Kang, CHEN Guoxing, WU Qi, et al. Effects of cyclic loading directions on liquefaction characteristics of saturated coral sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(7): 1 951 - 1 960.(in Chinese))
- [41] 梁珂, 陈国兴, 刘抗, 等. 饱和珊瑚砂最大动剪切模量的循环加载衰退特性及预测模型[J]. 岩土力学, 2020, 41(2): 601 - 611. (LIANG Ke, CHEN Guoxing, LIU Kang, et al. Degradation properties and prediction model of maximum shear modulus of saturated coral sand under cyclic triaxial loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(2): 601 - 611.(in Chinese))
- [42] 王义德, 汪云龙, 刘荟达, 等. 控制饱和度的珊瑚砂振动台液化模型试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2024, 44(6): 117 - 124. (WANG Yide, WANG Yunlong, LIU Huida, et al. Study on the shaking table liquefaction model test of coral sand with controlled saturation[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2024, 44(6): 117 - 124.(in Chinese))
- [43] 王鸾, 汪云龙, 袁晓铭, 等. 人工场地吹填珊瑚土抗液化强度大粒径三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(10): 2 819 - 2 829. (WANG Luan, WANG Yunlong, YUAN Xiaoming, et al. Experimental study on liquefaction resistance of hydraulic fill coralline soils at artificial sites based on large-scale dynamic triaxial apparatus[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(10): 2 819 - 2 829.(in Chinese))
- [44] 王义德. 珊瑚砂液化强度理论与判别方法试验研究[博士学位论文][D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2024.(WANG Yide. Experimental study on the liquefaction strength theory and assessment method of coral sand[Ph. D. Thesis][D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2024.(in Chinese))
- [45] WANG Y D, WANG Y L, WANG L, et al. Effects of membrane compliance on the normal-scale triaxial cyclic liquefaction test results

- of saturated coral sand[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2023, 171: 107983.
- [46] 王 鸾. 珊瑚土液化特性研究[博士学位论文][D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2021.(WANG Luan. Liquefaction Characteristics of coralline soils[Ph. D. Thesis][D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2021.(in Chinese))
- [47] 吴 杨, 崔 杰, 李 能, 等. 岛礁吹填珊瑚砂力学行为与颗粒破碎特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(10): 3 181 - 3 191.(WU Yang, CUI Jie, LI Neng, et al. Experimental study on the mechanical behavior and particle breakage characteristics of hydraulic filled coral sand on a coral reef island in the South China Sea[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(10): 3 181 - 3 191.(in Chinese))
- [48] 李 能, 吴 杨, 周福霖, 等. 岛礁吹填珊瑚砂不排水单调和循环剪切特性试验[J]. *中国公路学报*, 2023, 36(8): 152 - 161.(LI Neng, WU Yang, ZHOU Fulin, et al. Experiment of undrained monotonic and cyclic shear characteristics of hydraulic filled coral sand from reef island[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2023, 36(8): 152 - 161.(in Chinese))
- [49] 吴 杨, 崔 杰, 李 晨, 等. 细粒含量对岛礁吹填珊瑚砂最大动剪切模量影响的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(1): 205 - 216.(WU Yang, CUI Jie, LI Chen, et al. Experimental study on the effect of fines on the maximum dynamic shear modulus of coral sand in a hydraulic fill island-reef[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(1): 205 - 216.(in Chinese))
- [50] 吕亚茹, 丁思超, 李 欣, 等. 钙质砂循环剪切特性及抗剪强度弱化机制[J]. *岩石力学与工程学报*, 2024, 43(11): 2 811 - 2 822.(LV Yaru, DING Sichao, LI Xin, et al. Cyclic shear characteristics and shear strength weakening mechanism of calcareous sand[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2024, 43(11): 2 811 - 2 822.(in Chinese))
- [51] 陈平山, 吕卫清, 梁小丛, 等. 含细粒珊瑚土抗液化特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2023, 44(2): 337 - 344.(CHEN Pingshan, LV Weiqing, LIANG Xiacong, et al. Experimental study on liquefaction resistance characteristics of fine-grained coralline soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(2): 337 - 344.(in Chinese))
- [52] AKOSAH S, ZHOU L, CHEN J F, et al. Undrained dynamic behavior of geogrid-reinforced coral sand[J]. *Marine Georesources and Geotechnology*, 2025, 43(2): 244 - 259.
- [53] YOUD T L, IDRIS I M. Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2001, 127(4): 297 - 313.
- [54] SEED H B, IDRIS I M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1971, 97(9): 1 249 - 1 273.
- [55] ARANGO I. Magnitude scaling factors for soil liquefaction evaluations[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, 122(11): 929 - 936.
- [56] IDRIS I M. An update of the Seed-Idriss simplified procedure for evaluating liquefaction potential[C]// TRB Workshop on New Approaches to Liquefaction Analysis. Washington, DC: Federal Highway Administration. 1999: FHWA-RD - 99 - 165.
- [57] BAXTER C D P, BRADSHAW A S, GREEN R A, et al. Correlation between cyclic resistance and shear-wave velocity for providence silts[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2008, 134(1): 37 - 46.
- [58] 姜 朴, 孙德安. 砂土的共振柱试验与液化剪应力[J]. *水利学报*, 1987, (7): 68 - 70.(JIANG Pu, SUN Dean. Resonance column test and liquefaction shear stress of sandy soil[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1987, (7): 68 - 70.(in Chinese))
- [59] 石兆吉, 郁寿松. 砂性土剪切波速与液化强度的关系[J]. *世界地震工程*, 1991, (3): 16 - 23.(SHI Zhaoji, YU Shousong. The relationship between shear wave velocity and liquefaction intensity in sandy soil[J]. *World Earthquake Engineering*, 1991, (3): 16 - 23.(in Chinese))
- [60] SEED H B. Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1979, 105(2): 201 - 255.
- [61] FUHRIMAN M D. Crosshole seismic tests at two northern California sites affected by the 1989 Loma Prieta earthquake[M. S. Thesis][D]. Austin: University of Texas at Austin, 1993.
- [62] BRADY A G, SHAKAL A F. The Lorna Prieta, California, Earthquake of October 17, 1989-Strong Ground Motion[C]// U.S. Geological Survey Professional Paper. Washington DC: United States Government Printing Office, 1994: 1 551 - C.
- [63] DE ALBA P, BENOIT J, PASS D G, et al. The Lorna Prieta, California, Earthquake of October 17, 1989-Deep instrumentation array at the Treasure Island naval station[C]// U.S. Geological Survey Professional Paper. Washington DC: United States Government Printing Office, 1994: 1 550 - A.
- [64] DE ALBA P, FARIS J. Workshop on future research deep instrumentation array, Treasure Island NGES, July 27, 1996[R]. Durham: University of New Hampshire, 1996.
- [65] 中华人民共和国国家标准编写组. GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010.(in Chinese))
- [66] 袁晓铭, 王 海, 曹振中, 等. 汶川地震砾性土液化场地特征解析[J]. *地球物理学报*, 2017, 60(7): 2 733 - 2 743.(YUAN Xiaoming, WANG Hai, CAO Zhenzhong, et al. Interpretation of characteristics of gravelly soils sites that liquefied in Wenchuan earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(7): 2 733 - 2 743.(in Chinese))
- [67] 石兆吉, 郁寿松, 丰万玲. 土壤液化势的剪切波速判别法[J]. *岩土工程学报*, 1993, 15(1): 74 - 80.(SHI Zhaoji, YU Shousong, FENG Wanling. The method for judging the shear wave velocity of soil liquefaction potential[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1993, 15(1): 74 - 80.(in Chinese))
- [68] 王 克, 孙 锐, 袁晓铭. 动剪应力折减系数影响因素及计算公式[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(1): 177 - 189.(WANG Ke, SUN Rui, YUAN Xiaoming. Influence factors and formula for dynamic stress reduction coefficient[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(1): 177 - 189.(in Chinese))